Chapitre II
Introduction à la mécanique des fluides



Mme L.Bounar

USTHB/FGMGP/Dépt.T.E

Octobre 2012

II-1 Introduction

La mécanique des fluides(MDF) a pour objet l'étude du comportement des fluides **au repos et en mouvement**.

Domaines d'utilisation :

La mécanique des fluides couvre un large domaine d'applications, de l'écoulement du sang dans les capillaires, à l'écoulement de l'eau dans les conduites jusqu'à l'écoulement du gaz dans les gazoducs ou le pétrole dans les oléoducs pour des longues distances.

La mécanique des fluides est la clé pour la compréhension de la majorité des phénomènes naturels de l'univers : mouvement des couches d'air dans l'atmosphère (le déplacement des nuages), des océans, des glaciers ainsi que des laves des volcans





II-2 Définitions

II-2-1Notion de fluide

On appelle fluides l'ensemble des gaz et liquides.

Exemples : l'eau liquide, l'huile, l'essence (liquide), l'oxygène (gaz), l'air (gaz)……….

Un fluide et défini comme étant un corps continu **sans rigidité** (contrairement aux solides) et qui peut subir de grandes déformations sous l'action des forces ⟹ **Un fluide est un corps déformable.**

Les fluides sont des substances qui peuvent s'écouler.

II-2-2 Propriétés d'un fluide

Un fluide se caractérise par trois (03) grandeurs principalement : Pression, température et masse volumique.

II-2-2-1 Notions de compressibilité et incompressibilité

Un fluide est dit **compressible** si sa masse volumique **ρ varie avec la pression ou la température. En général, les gaz sont des fluides compressibles (ρ varie) et qui occupent tout le volume qui leur est offert.**

Un fluide est dit **incompressible** si sa masse volumique **ρ est constante (ρ ne varie pas avec la pression ou la température…).**

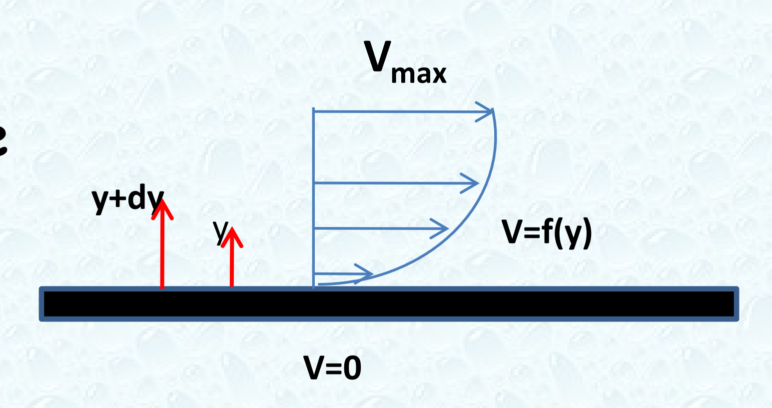
Tous les liquides sont des fluides incompressibles: $\rho_{(liquide)}$=cte

Remarque : Les gaz peuvent être considérés incompressibles dans certaines conditions de pression et température.

Exemple : L'air dans les conditions atmosphériques : 100KPa et $T_{ambiante}$

II-2-2-2 Notion de viscosité

a) C'est une propriété **des fluides réels et visqueux**. Elle mesure **le taux de frottements** entre les couches des fluides.



L'expérience (de Newton) a montré que lors d'un écoulement d'un fluide le long d'une paroi, le profil de vitesse des couches constituant le fluide n'ont pas la même vitesse (nulle à la paroi et maximale loin de la paroi). **Ceci est dû aux contraintes de cisaillement (frottement)** τ

La loi de Newton : $\tau = \mu \frac{dV}{dy}$

Avec $\tau = \frac{F_{tang.}}{S}$ et $\frac{dU}{dy}$: gradient de vitesse

μ viscosité dynamique, son unité : N s /m² = Pa.s ou Pouiseuille [P_l]

•On définit également **la viscosité cinématique ν:**

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

•[m²/s] ou Stokes [St]

Exemple de fluides visqueux : les huiles

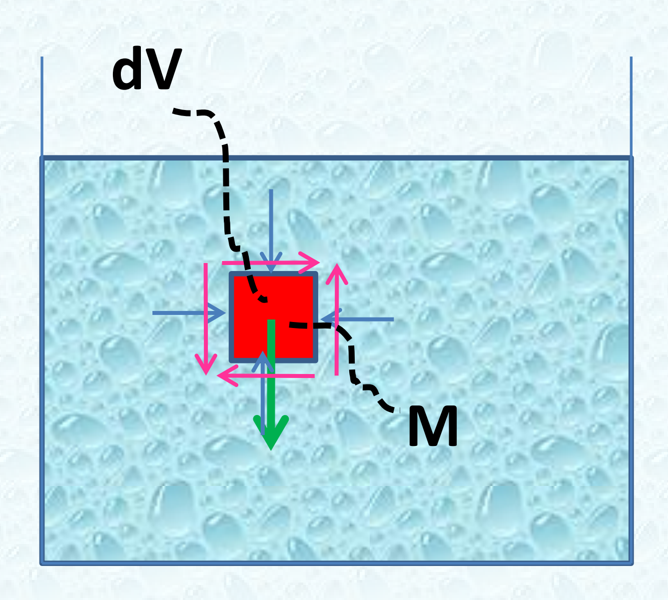
b) Un fluide est dit **parfait** si **sa viscosité est négligeable (pas de frottements lors de l'écoulement).**

Exemple : L'eau, l'air

II-3 La statique des fluides

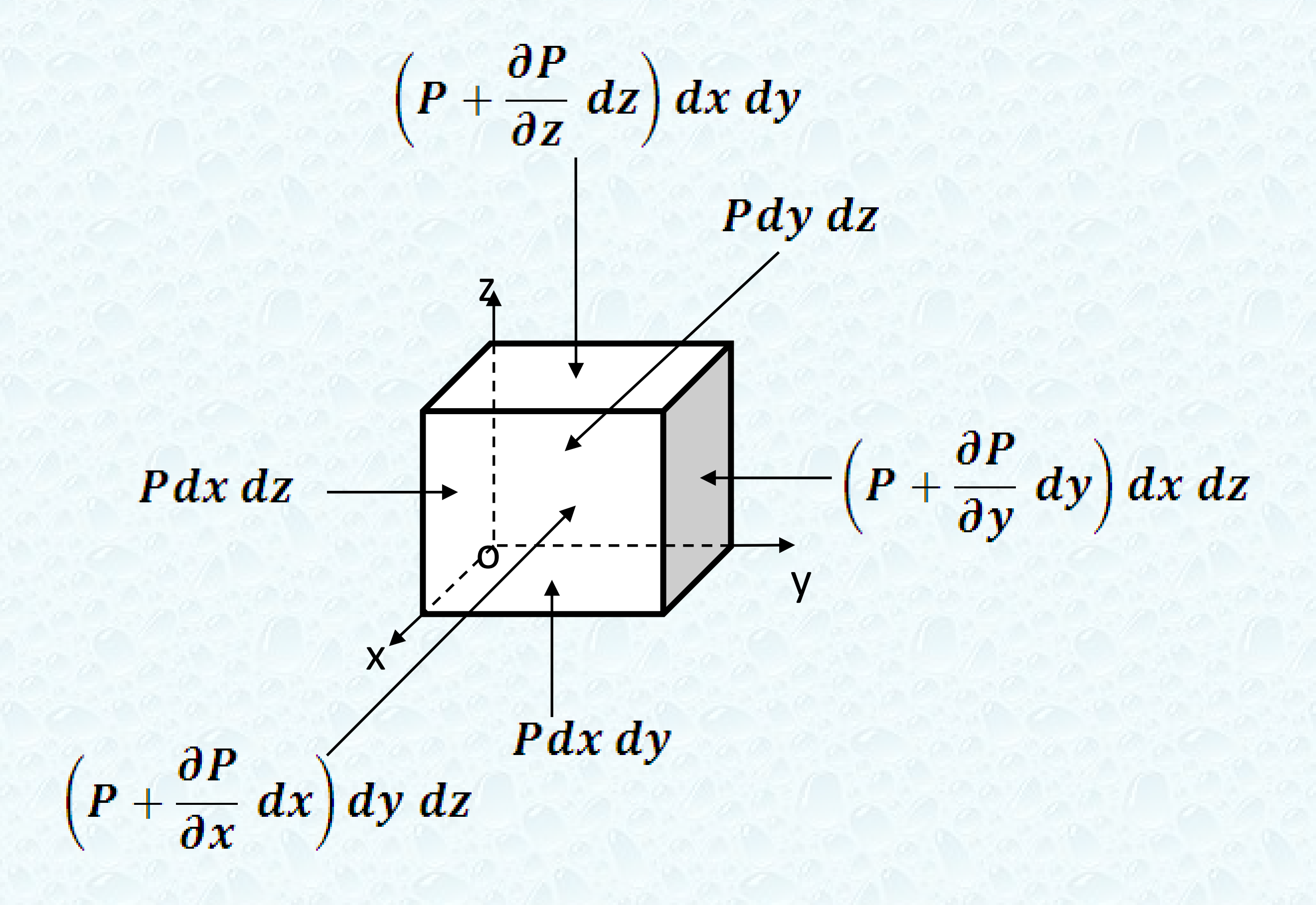
II-3-1 L'équation fondamentale

Considérons un élément de fluide infinitésimal de volume dV , en équilibre (statique)/ à un repère orthonormé R(o,x,y,z). L'élément de fluide est soumis à son propre poids ($dm\, g = \rho\, dV\, g = \rho\, dxdydz\, g$) et aux forces de pression.



L'équilibre pour cet élément de volume donne :

$$\sum \vec{F}_{pression} + \rho dV \vec{g} = 0$$



En considérant que:

$\frac{\partial P}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial y}\ et\ \frac{\partial P}{\partial z}$ sont les variations de P le long de dx, dy et dz, l'équilibre donne :

Suivant l'axe des X :

$$P_x dydz - (P_x + \frac{\partial P}{\partial x}dx)dydz = 0$$

Suivant l'axe des Y :

$$P_y dxdz - (P_y + \frac{\partial P}{\partial y}dy)dxdz = 0$$

Suivant l'axe des Z :

$$P_z dxdy - (P_z + \frac{\partial P}{\partial z}dz)dxdy - \rho g dxdydz = 0$$

D'où obtient :

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 0$$ ⇒ P ne varie pas suivant x

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0$$ ⇒ P ne varie pas suivant y

⇒ $$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{dP}{dz}$$

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \quad ou \quad dP = -\rho g dz$$

C'est l'équation fondamentale de la statique des fluides

II-3-2 Cas de l'hydrostatique

L'hydrostatique est la statique des fluides incompressibles (tels que les liquides ou les gaz à faible variation de pression) dans le champ de pesanteur $\vec{g}$.

Dans le cas des fluides incompressibles, la masse volumique ρ est constante.
Dans ce cas on peut intégrer la relation précédente entre deux points M_1 et M_2 **du même fluide**.

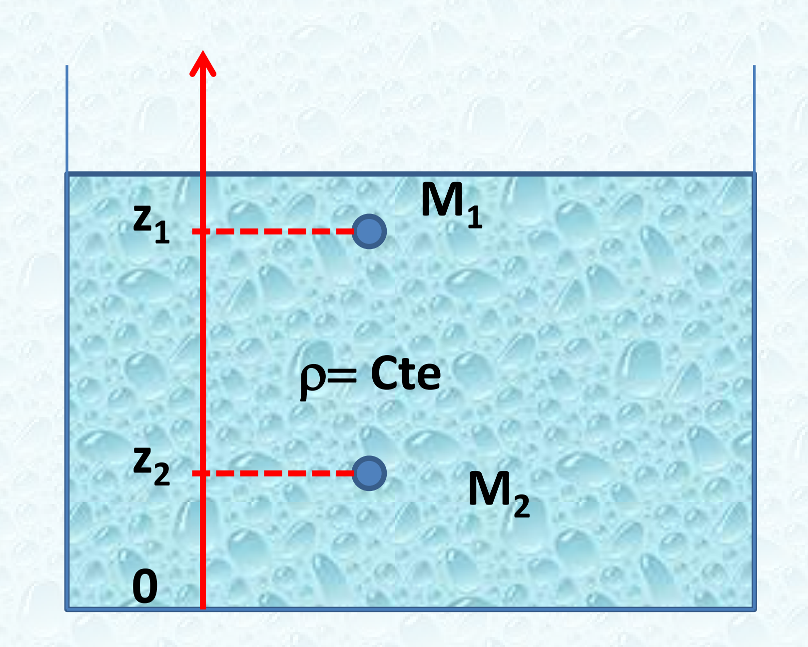
$$\int_1^2 dp = \int_1^2 -\rho g dz = -\rho g \int_1^2 dz$$

$$p_2 - p_1 = -\rho g (z_2 - z_1)$$

Ou bien :

$$p_2 + \rho g z_2 = p_1 + \rho g z_1$$

$$p + \rho g z = Cte$$



Remarques :

- La pression augmente lorsque z diminue à cause du signe (-)
- Si les deux points M1 et M2 sont séparés d'une hauteur h

$$z_1 - z_2 = h \Rightarrow p_2 - p_1 = \rho g h \Rightarrow p_2 = p_1 + \rho g h$$

- Si les deux points M_1 et M_2 sont d'égales côtes :

$$z_1 = z_2 \Rightarrow \; p_2 = p_1$$

Conclusions :

Pour un fluide incompressible au repos :

✓**La pression croît du haut en bas.**

✓**Les surfaces isobares sont des plans horizontaux.**

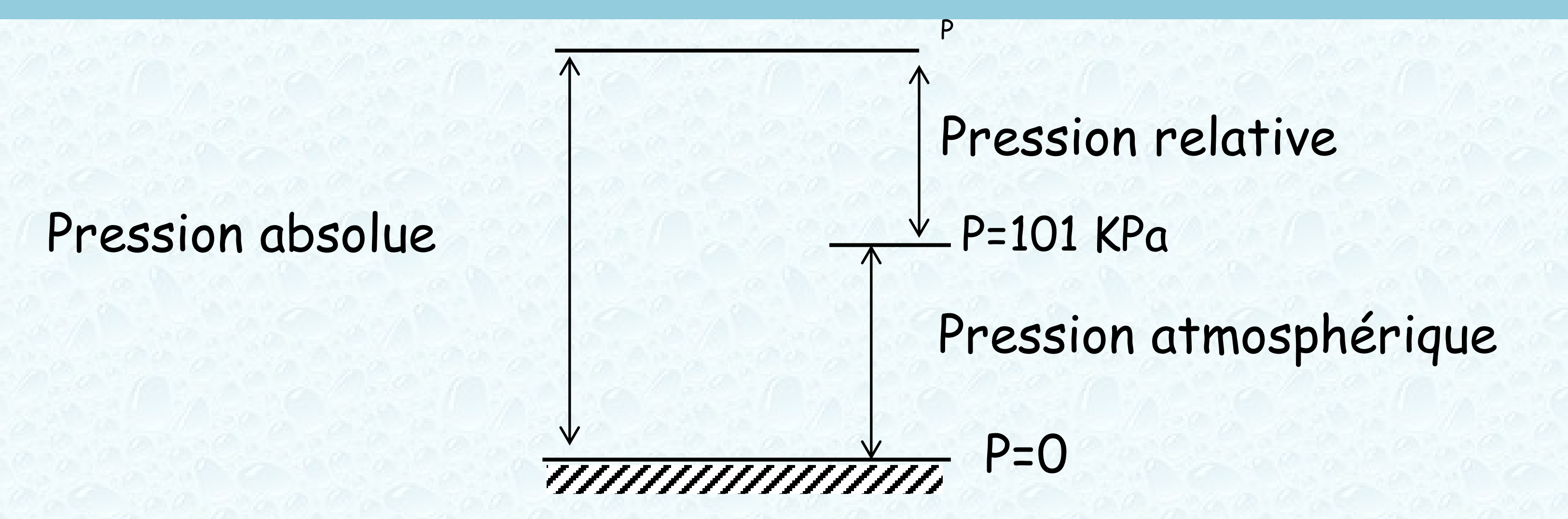
✓ **La surface de séparation entre deux fluides non miscibles (qui ne se mélangent pas) est un plan horizontal**

I-3-3 Mesure de pression

Notions de Pressions absolue et relative

a) Dans de nombreuses relations c'est la pression absolue qui est utilisée.

Pression absolue=Pression relative +Pression atmosphérique



La pression absolue est mesurée relativement au vide absolu.

b) Mesure de la pression atmosphérique :

Appelée **également pression barométrique** est mesurée par un baromètre.

- Pour cela, on fait le vide dans une éprouvette et on la plonge dans un récipient rempli de mercure (Hg). On mesure la hauteur h jusqu'à laquelle monte le mercure.
- L'application de la loi hydrostatique entre les points B et A donne :

$P_B = P_A + \rho_{Hg} g h$; Comme $P_A = 0$ (vide) On a : $P_B = P_{atm} = \rho_{Hg} g h$

Pour : $\rho_{Hg} = 13600\ Kg/m^3$, $g = 9.81\ m/s^2$ et $h = 760mm$

On obtient : P_{atm} = **101396.16 Pa = 101.396 kPa**

•Si l'éprouvette est plongée **dans de l'eau** au lieu du mercure, la hauteur h devient :

$$h = \frac{P_{atm}}{\rho_{eau}\ g} = \frac{101\ 10^3}{10^3\ 9.81} \approx 10\ m$$

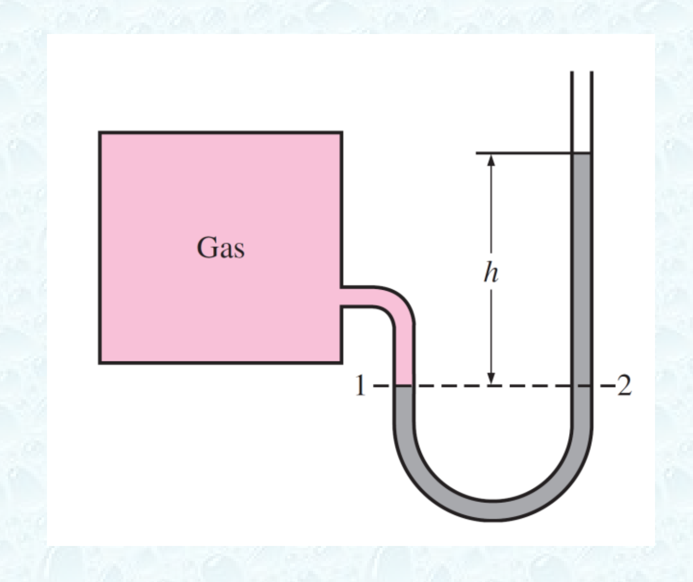
c) La pression relative :

Appelée également **pression manométrique** est mesurée par rapport à la pression atmosphérique par des manomètres.

Un manomètre est constitué d'un tube en U en plastique ou en verre qui contient un ou plusieurs fluides tels que : le mercure, l'eau, l'alcool, l'huile….

Exemple de manomètre :

Il sert à mesurer la pression relative d'un gaz se trouvant dans un réservoir.
La pression qui règne dans le réservoir est constante car la masse volumique des gaz est faible.



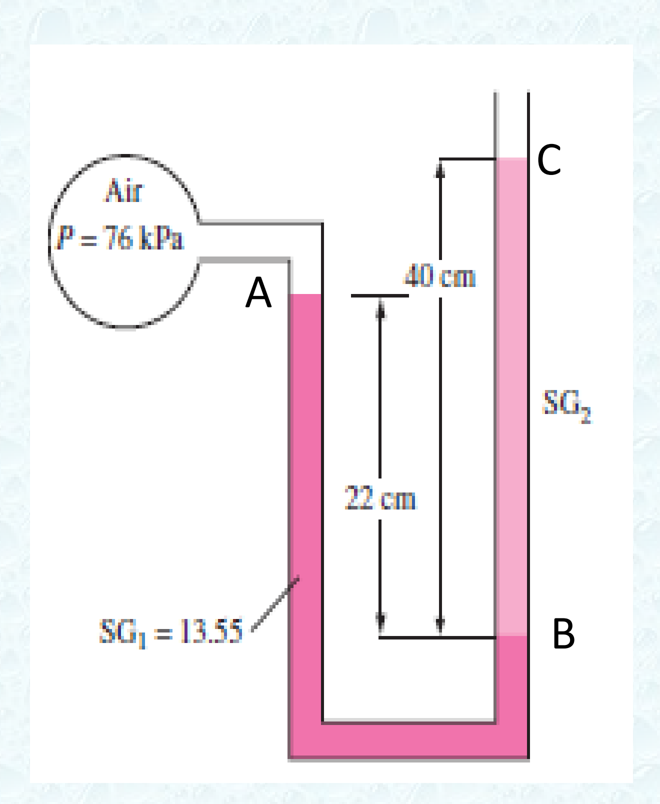
L'application de la loi de l'hydrostatique donne :

$P_1 = P_2$ Avec $P_1 = P_{gaz}$ $\Longrightarrow$

$P_2 = P_{atm} + \rho_{fluide}\, gh$ $P_{rel} = P_{mano} = P_2 - P_{atm} = \rho_{fluide}\, gh$

d) Application : Exercice (n°23 de la série 2)

Considérer un manomètre à double fluide relié à une conduite d'air tel qu'indiqué sur la figure ci-contre.



Si la densité du fluide 1 est de 13.55, déterminer la densité du fluide 2 si la pression absolue de l'air est de 76 KPa.

Supposer une pression atmosphérique de 100 KPa et on donne $g=9.81 m/s^2$

Solution : On cherche la densité du fluide 2

$$d_2 = \frac{\rho_2}{\rho_{eau}} \Longrightarrow \rho_2 = d_2 \, . \, \rho_{eau}$$

$$d_1 = \frac{\rho_1}{\rho_{eau}} \Longrightarrow \rho_1 = d_1 \, . \, \rho_{eau} = 13.55 \times 10^3 = 13550 \ Kg/m^3$$

Application de la loi de l'hydrostatique donne :

Pour le fluide 1, entre A et B: $P_B = P_A + \rho_1 \, g \, h_{AB}$

Pour le fluide 2, entre B et C: $P_B = P_{atm} + \rho_2 \, g \, h_{BC}$

D'où, on a : $P_A + \rho_1 \, g \, h_{AB} = P_{atm} + \rho_2 \, g \, h_{BC}$

$$\Longrightarrow \rho_2 = \frac{(P_A - P_{atm}) + \rho_1 \, g \, h_{AB}}{g \, h_{BC}}$$

Application numérique :

$$\rho_2 = \frac{(76-100)\ 10^3 + 13550 * 9.81 * 022}{9.81 * 0.4}$$

$\Rightarrow$ ρ_2 =1336.29 Kg/m^3

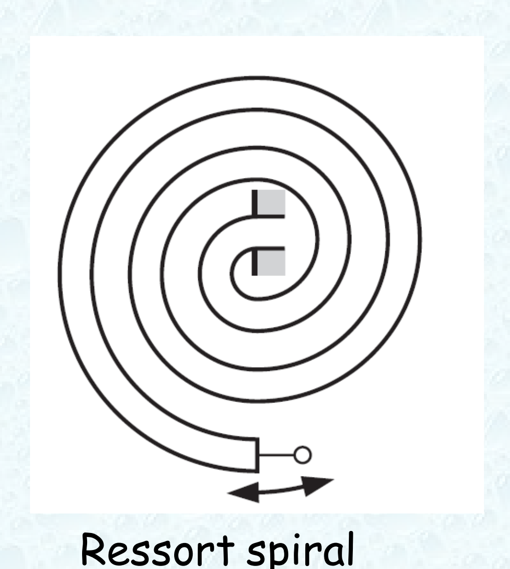
$$\Rightarrow\ d_2 = \frac{\rho_2}{\rho_{eau}} = \frac{1336.29}{1000} = 1.33$$

Autres moyens de mesure de la pression

Un autre moyen très utilisé pour la mesure de la pression relative est le **manomètre de Bourdon.**



Il est composé d'un ressort métallique creux en forme de spiral dont l'extrémité est fermée et connectée à une aiguille. Sous l'effet de la pression du fluide le ressort s'allonge et déplace l'aiguille qui indique la valeur de la pression mesurée.



Ressort spiral

II-4 La dynamique des fluides

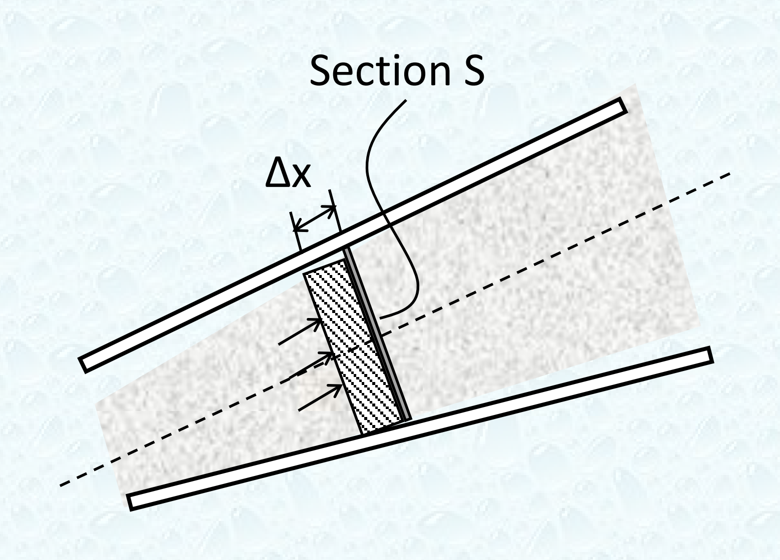
Les fluides qui ne sont pas au repos, sont en **écoulement** ou dans un état dynamique.

Ci-dessous, on présentera quelques propriétés des écoulements.

II-4-1 Notion de débit

•Débit Volumique

Soit un écoulement d'un fluide dans une conduite. Pendant un intervalle de temps Δt, le volume du fluide qui traverse la section S est : $\Delta V = S\,\Delta x$



On appelle **débit volumique le volume du fluide qui traverse une section S par unité de temps.**

$$Q_V = \lim \frac{\Delta V}{\Delta t} = \lim S \frac{\Delta x}{\Delta t} = V\,S$$

Son unité : m^3/s

Avec : V vitesse moyenne de l'écoulement, normale à la section S

- **Débit massique**

C'est la masse du fluide qui traverse une section S par unité de temps.

$$Q_m = \lim \frac{\Delta m}{\Delta t} = \lim \rho\, S \frac{\Delta x}{\Delta t} = \rho V\, S$$

Son unité : Kg /s

Avec : V vitesse moyenne de l'écoulement, normale à la section S

$$Q_m = \rho Q_v$$

II-4-2 Notion de régime

•Régime permanent (stationnaire)

•Un régime est dit **permanent** si ses propriétés (sa vitesse, sa pression et sa masse volumique) **ne varient pas dans le temps.**

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0, \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \; et \; \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

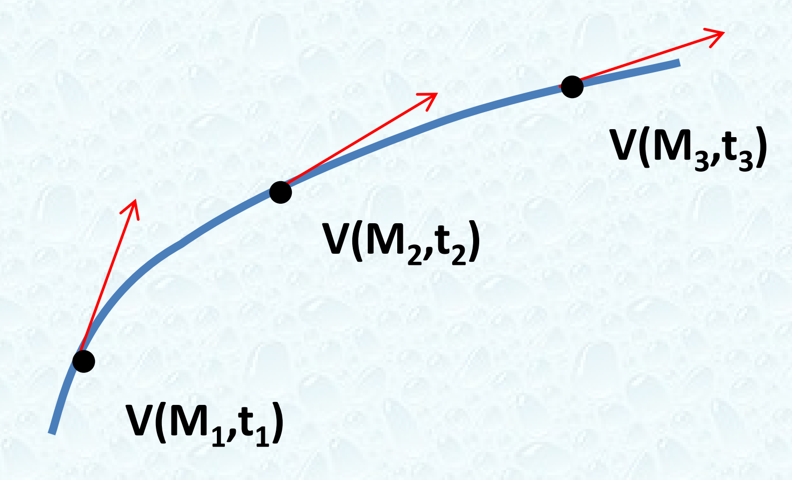
•Régime instationnaire

Un régime est dit instationnaire si **au moins une** de ses propriétés (vitesse, pression ou masse volumique) **varie dans le temps**.

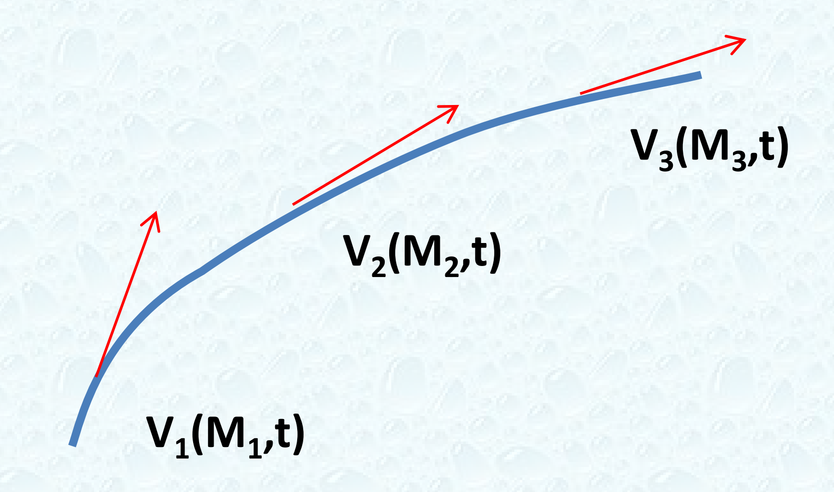
$$\frac{\partial V}{\partial t} \neq 0 \; ou \; \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0 \; ou \frac{\partial \rho}{\partial t} \neq 0$$

II-4-3 Notions de trajectoire, ligne de courant et tube de courant

• **Trajectoire** : c'est l'ensemble **les positions qu'occupe une particule** d'un fluide en écoulement **pendant des instants différents.**

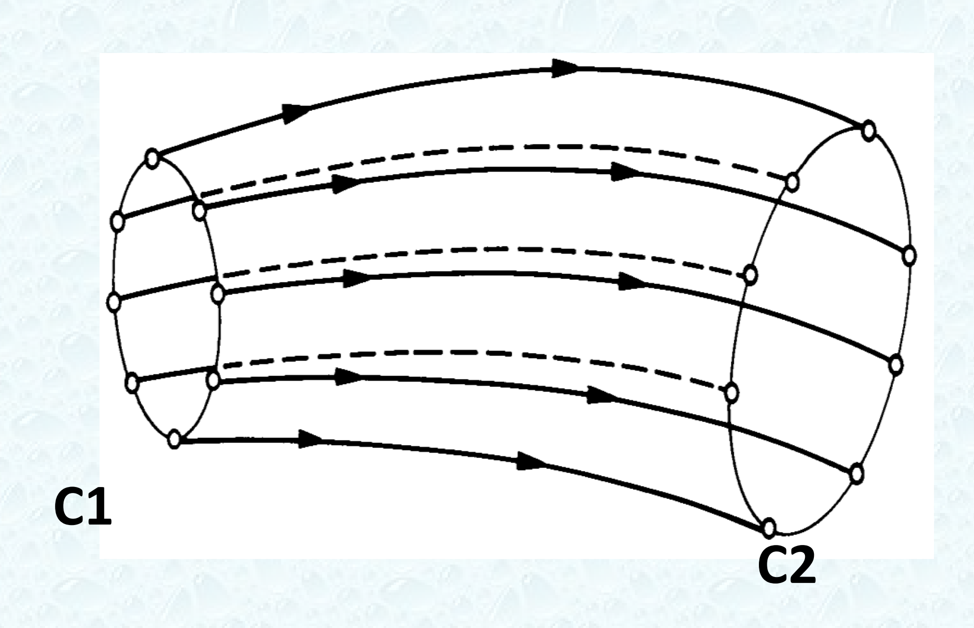


•Ligne de courant : Elle représente la **tangente aux vecteurs vitesses de plusieurs particules** d'un fluide en écoulement à **un instant donné t.**



Remarque : Dans le cas du régime permanent, les trajectoires se confondent avec les lignes de courant.

Tube de courant : est l'ensemble des lignes de courant s'appuyant sur un contour fermé *C*

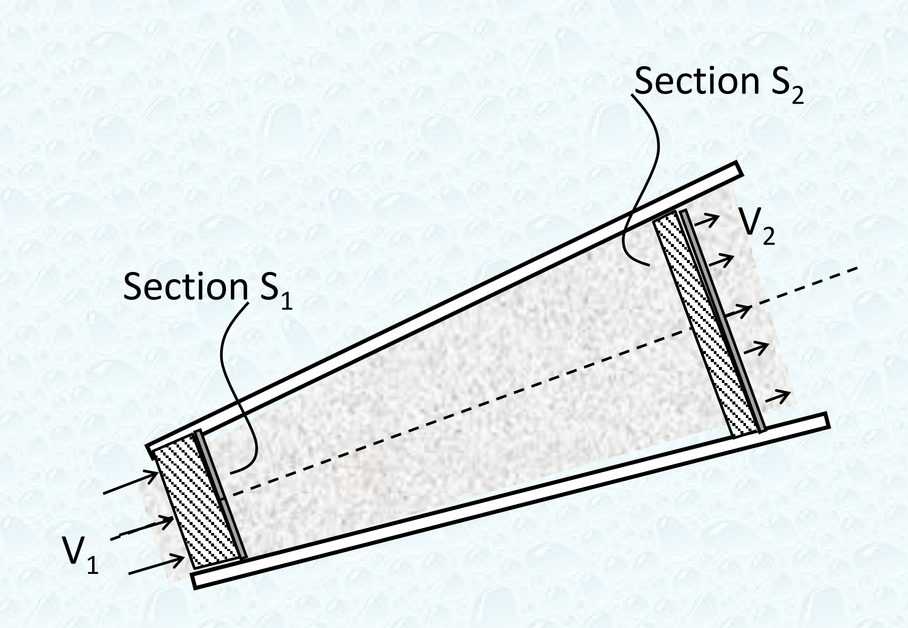


II-4-4 Equation de conservation de masse dans le cas du régime permanent

Considérons un fluide en écoulement dans une conduite.

Soient :

- Δm_1 la masse traversant la section S_1 pendant un intervalle de temps ΔT
- Δm_2 la masse traversant la section S_2 pendant le même intervalle de temps ΔT.



En régime permanent, le principe de la conservation de la masse donne :

$$\Delta m_1 = \Delta m_2$$

En devisant par ΔT, on obtient :

$\Delta m_1/\Delta T = \Delta m_2/\Delta T$

En faisant tendre ΔT vers 0, on obtient :

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta m_2}{\Delta t} \rightarrow Q_{m1} = Q_{m2}$$

Soit :

$$\rho_1 S_1 V_1 = \rho_2 S_2 V_2$$

Débit massique constant le long de l'écoulement

•Si le fluide est **incompressible** (ρ=cte)

$$Q_V = V_1 S_1 = V_2 S_2 = VS = cte$$

Débit volumique constant le long de l'écoulement

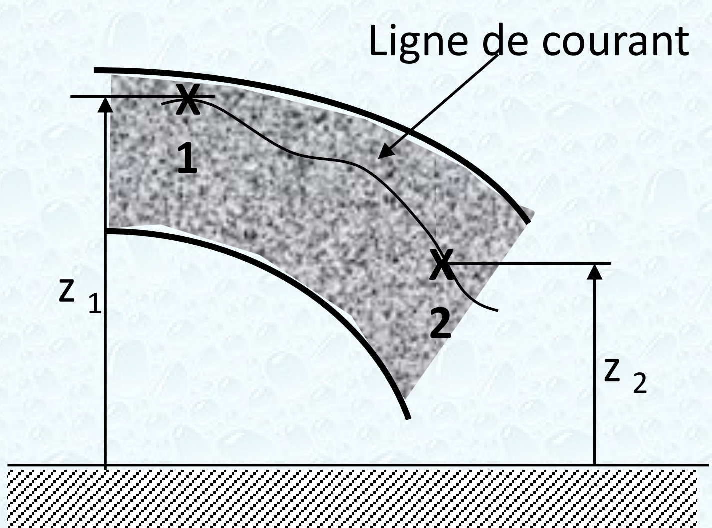
II-4-5 Dynamique des fluides parfaits

A. Ecoulement sans échange de travail

On démontre dans le cas :

- D'un fluide parfait et incompressible
- Régime permanent
- Le long d'une ligne de courant

Que l'écoulement entre deux points est régi par une équation appelée : **Equation de Bernoulli**



Plan de référence = z =0

•En termes de pression :

$P_1 + \rho (V_1)^2/2 + \rho g z_1 = P_2 + \rho (V_2)^2/2 + \rho g z_2$

$P + \rho (V)^2/2 + \rho g z = cte$ Son unité :Pa

Avec P : pression statique, $\rho (V)^2/2$:pression dynamique , $\rho g z$:pression de pesanteur

•En termes de hauteur :

$P_1/\rho g + (V_1)^2/2g + z_1 = P_2/\rho g + (V_2)^2/2g + z_2$

$P/\rho g + (V)^2/2g + z = cte$ Son unité :m

Avec : $P/\rho g + z$: hauteur piézométrique
$(V)^2/2g$: hauteur dynamique

•En termes d'énergie :

$P_1 / \rho + (V_1)^2 /2 + g\, z_1 = P_2 / \rho + (V_2)^2 /2 + g\, z_2$

$P/\rho + (V)^2 /2 + g\, z = cte$ Son unité :Joules/Kg

Avec : $(V)^2 /2$:énergie cinétique
$g\, z$: énergie potentielle

Chapitre II (suite)
Introduction à la mécanique des fluides



Mme L.Bounar

USTHB/FGMGP/Dépt.T.E

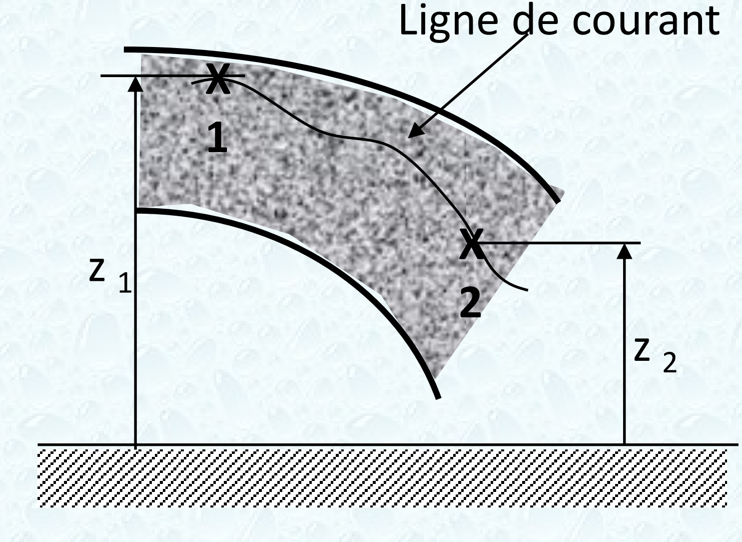
Octobre 2012

II-4-5 Dynamique des fluides parfaits

C'est le cas des écoulements où les frottements peuvent être négligés.

A. Ecoulement sans échange de travail

On démontre dans le cas :
- D'un fluide parfait et incompressible
- Régime permanent
- Le long d'une ligne de courant



Que l'écoulement entre deux points est régi par une équation appelée : **Equation de Bernoulli**

- **En termes de pression :**

$$P_1+\rho\,(V_1)^2/2 + \rho\,g\,z_1 = P_2+\rho\,(V_2)^2/2 + \rho\,g\,z_2 \quad (1)$$

$$P+\rho\,(V)^2/2 + \rho\,g\,z=cte$$

Avec P : pression statique, $\rho\,(V)^2/2$:pression dynamique [Pa] ,
$\rho\,g\,z$:pression de pesanteur [Pa]

- **En termes de hauteur :**

$$P_1/\rho\,g + (V_1)^2/2g + z_1 = P_2/\rho\,g + (V_2)^2/2g + z_2 \quad (1')$$

$$P/\rho\,g + (V)^2/2g + z = cte$$

Avec : $P/\rho\,g + z$: hauteur piézométrique [m]
$(V)^2/2g$: hauteur dynamique [m]

•En termes d'énergie :

$$P_1 /\rho + (V_1)^2 /2 + g\, z_1 = P_2 /\rho + (V_2)^2 /2 + g\, z_2 \quad (1'')$$

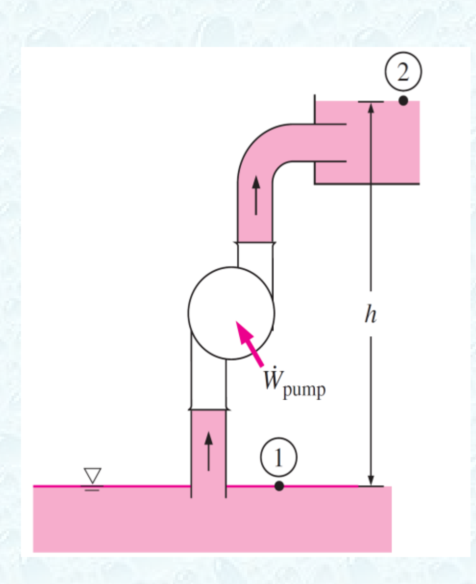
$$P/\rho + (V)^2 /2 + g\, z = cte$$

Avec : $(V)^2 /2$:énergie cinétique **[Joules/Kg]**
$g\, z$: énergie potentielle **[Joules/Kg]**

B- Ecoulement avec échange de travail

On démontre dans le cas :
- D'un fluide parfait et incompressible
- Régime permanent
- Lorsque le fluide traverse une machine (turbine, pompe….) ⟹ **il échange du travail avec cette machine.**

Que l'écoulement entre deux points (1) et (2) à l'amont et à l'aval de la machine est régi par l'équation d'énergie suivante :



$$P_1/\rho + (V_1)^2/2 + g\,z_1 = P_2/\rho + (V_2)^2/2 + g\,z_2 + \frac{\dot{W}}{Q_m} \quad (2)$$

$$P_1 /\rho + (V_1)^2 /2 + g\, z_1 = P_2 /\rho + (V_2)^2 /2 + g\, z_2 + \frac{\dot{W}}{Q_m}$$

Avec :

$\dot{W}$: La puissance de la machine en Watt : en J/s

$\dot{W} > 0$ Si la machine est motrice (exemple : turbine, éolienne).La machine fournit de l'énergie.

$\dot{W} < 0$ Si la machine est réceptrice (exemple : pompe, ventilateur). La machine reçoit de l'énergie.

Q_m : Débit massique du fluide en Kg/s

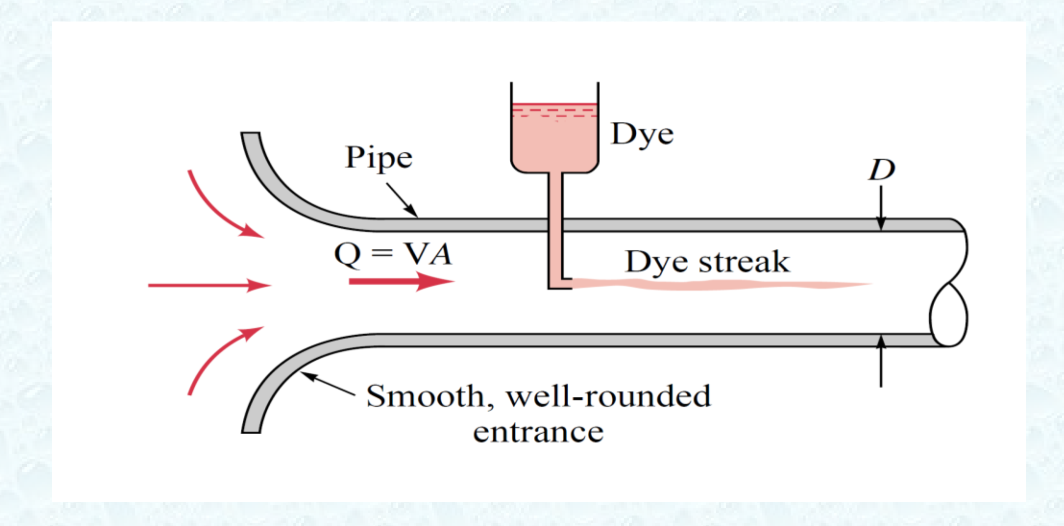
$\dot{W}/Q_m : J/Kg$

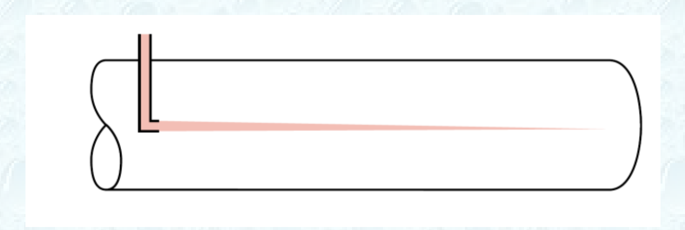
II-4-6 Dynamique des fluides visqueux

Ci-dessous, on présentera quelques propriétés des écoulements des fluides visqueux **où l'effet des frottements est non négligeable.**

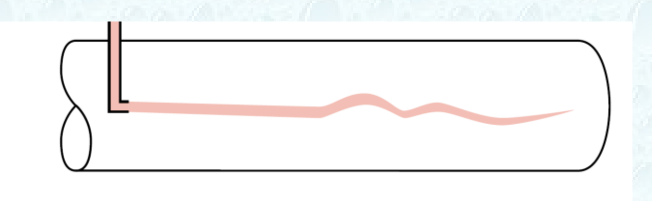
A- Types de Régimes d'écoulement

•L'expérience réalisée par **Reynolds** (1883) consistait à injecter un colorant lors de l'écoulement de l'eau dans une conduite en verre cylindrique et rectiligne et puis à faire croitre progressivement la vitesse de l'eau dans la conduite. Les observations ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : **laminaire et turbulent**.





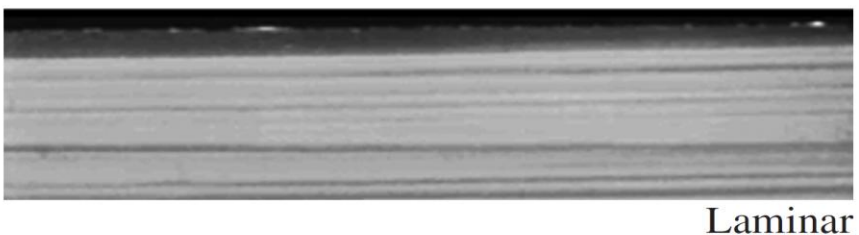
Régime laminaire
Le colorant constitue des lignes droites.

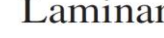


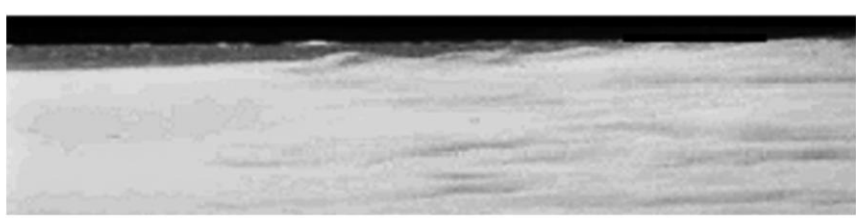
Régime transitoire
Le colorant constitue des lignes spirales



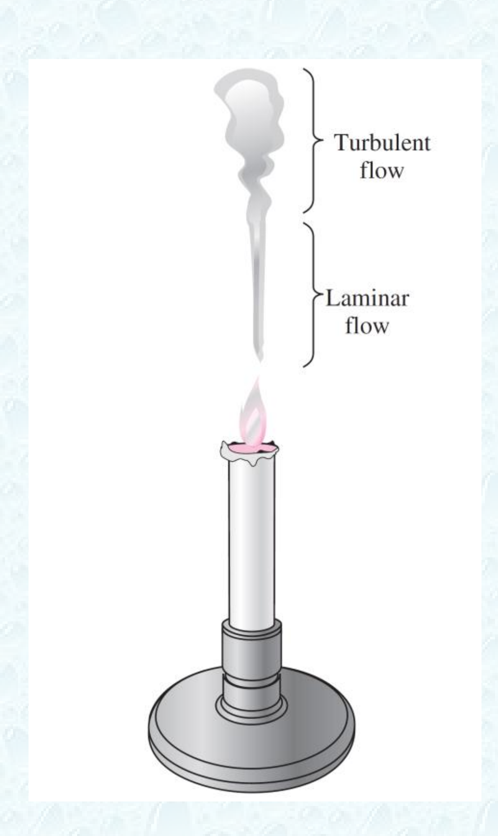
Régime turbulent
Le colorant est complètement mélangé











Les régimes laminaire et turbulent de la fumée d'une bougie

•**Ecoulement laminaire :** *C'est* un écoulement **ordonné** où les particules du fluide se déplacent en lignes droites parallèles disposées en couches ou lamelles.
C'est le cas des écoulements à faibles vitesses des fluides à forte viscosité (telles que les huiles).

•**Ecoulement turbulent :** *C'est* un **écoulement complètement désordonné** dans lequel, les particules de fluide se déplacent **dans toutes les directions au hasard. Il se produit dans les écoulements à** ***grandes*** **vitesses pour les fluides à faible viscosité tel que l'air**.

•**Ecoulement transitoire :** *C'est* un écoulement **intermédiaire** entre les régimes laminaire et turbulent.

B- Nombre de Reynolds

C'est **un nombre sans dimensions** qui permet de distinguer entre les deux régimes d'écoulements laminaire et turbulent. Il est donné par :

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad \text{ou} \quad Re = \frac{V D}{\nu}$$

Avec : ρ masse volumique du fluide [kg/m^3],
V vitesse du fluide [m/s]
D diamètre de la conduite [m],
μ Viscosité dynamique [Pa.s]
Et ν Viscosité cinématique [m^2/s] ou Stokes

0 < Re < 2000	**Régime laminaire**
2000 <Re< 4000	**Régime transitoire**
Re> 4000	**Régime turbulent**

C- Equation de Bernoulli avec pertes de charges

Elle s'applique entre deux points de l'écoulement dans le cas :

- D'un fluide visqueux et incompressible
- Régime permanent
- Pour un écoulement qui ne traverse aucune machine (pompe, turbine) ⟹ **Il n'échange pas du travail avec cette machine.**

- Elle est donnée par :

$$P_1 /\rho + (V_1)^2 /2 + g\, z_1 = P_2 /\rho + (V_2)^2 /2 + g\, z_2 + J_{12} \quad (3)$$

- J_{12} représente les pertes de charges, c'est une énergie perdue par le fluide sous forme de chaleur (J_{12})

$$J_{12} = \sum J_L + \sum J_S$$

- J_L Pertes de charges régulières ou linéaires sont dues aux frottements du fluide avec les parois de la conduite. Elles dépendent de la longueur, du diamètre et de la rugosité de la conduite ainsi que de la vitesse de l'écoulement.

- J_S Pertes de charges singulières sont dues aux variations brusques de section et de direction (coudes, élargissement ou rétrécissement de la section). Elles dépendent de la forme des changements de section et de la vitesse de l'écoulement.

D- Calcul des pertes de charges linéaires

Formule de WEISBACH :

$$J_L = \lambda \frac{V^2 L}{2D}$$

Avec :

λ **Coefficient de frottements ou pertes de charge linéaires** [sans unité]

V Vitesse moyenne dans la conduite [m/s]

L longueur de la conduite [m]

Selon le type de l'écoulement, le coefficient de frottements λ se calcule par différentes formules :

Régime laminaire Re< 2000 → $\lambda = \frac{64}{R_e}$

Régime turbulent lisse 2000<Re < 10^5 → $\lambda = \frac{0.316}{R_e^{0.25}}$

Régime turbulent rugueux Re>10^5 → $\lambda = 0.79\sqrt{\frac{\varepsilon}{D}}$

Avec : ε Rugosité [mm]

D diamètre de la conduite

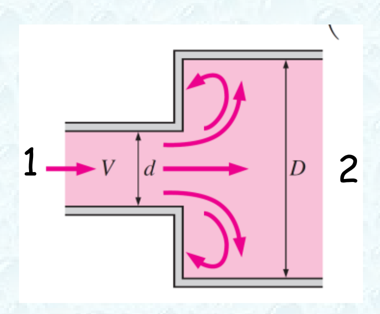
E- Calcul des pertes de charges singulières

Elles se calculent par la relation suivante :

$$J_s = \xi \frac{V^2}{2}$$

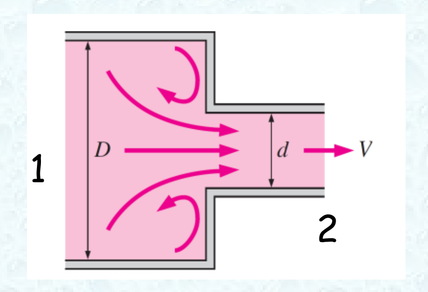
Avec : V vitesse dans les changements de section ou dans les coudes.

ξ coefficient de forme sans dimensions donné par le constructeur



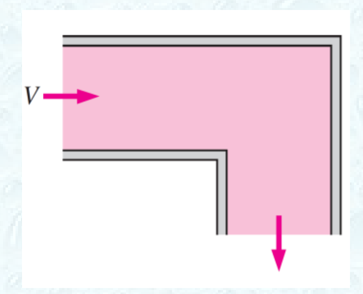
Elargissement brusque

$$\xi \cong \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$$

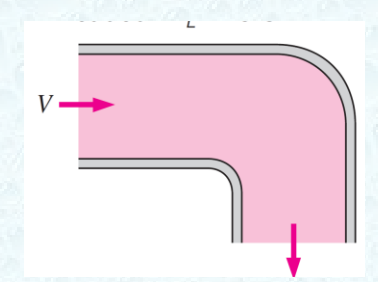


Rétrécissement brusque

$$\xi \cong \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)^2$$

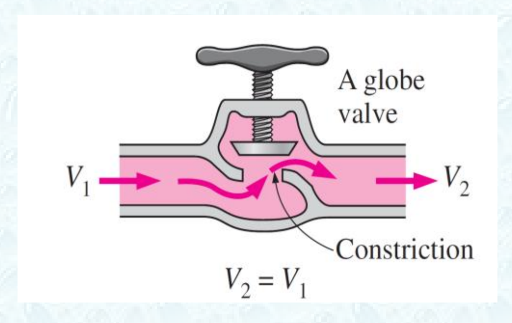


Coude : $\xi \simeq 1$



Coude arrondi

$0.3 < \xi < 0.9$



Valve ou robinet

$0.05 < \xi < 1$

F- Equation d'énergie avec travail et pertes de charges

Elle s'applique entre deux points de l'écoulement dans le cas :

- D'un fluide visqueux et incompressible
- Régime permanent
- Lorsque le fluide traverse une machine (turbine, pompe….)

⟹ **Il échange du travail avec cette machine.**

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + g\,z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + g\,z_2 + \frac{\dot{W}}{Q_m} + J_{12} \quad (4)$$

Avec :

$\dot{W}$: La puissance de la machine en Watt : W

Q_m : Débit massique du fluide en Kg/s

$J_{12} = \sum J_L + \sum J_S$: Pertes de charges linéaires et singulières

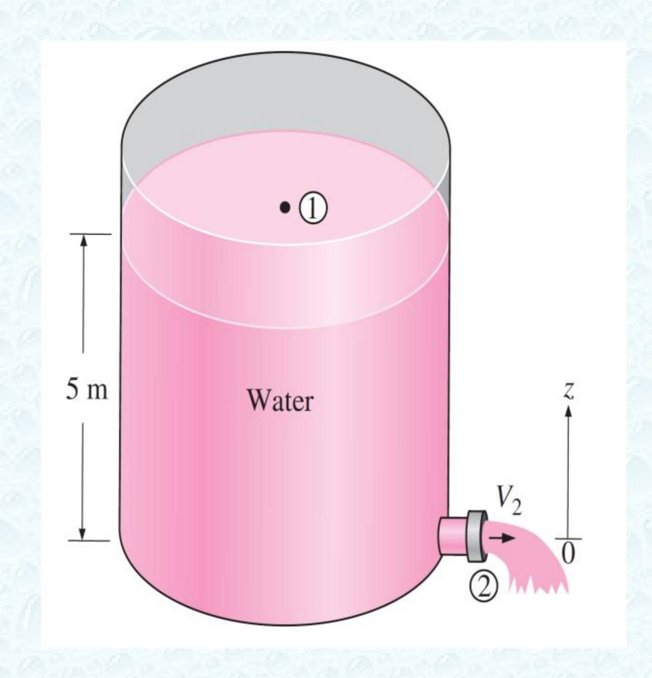
G-Conclusion

De ce qui précède, on remarque que l'ensemble des pertes de charge (linéaires et singulières) dans une canalisation diminue lorsque :

- La longueur de canalisation diminue.
- La viscosité des fluides diminue.
- Le nombre de changements de section et de coudes sur la canalisation est réduit.
- Les matériaux des conduites utilisés sont de faible rugosité.

H- Application :

Un large réservoir ouvert à l'atmosphère est rempli d'eau jusqu'à une hauteur de 5m. Cette eau s'écoule en régime permanent à travers un orifice ouvert situé au fond du réservoir.



Déterminer la vitesse de l'eau à la sortie de l'orifice.

On donne : g= 9.81m/s^2

Solution :

On est dans le cas :

- D'un fluide parfait et incompressible
- Régime permanent
- L'écoulement ne traverse aucune machine (pompe, turbine)

On applique l'équation de Bernoulli sans pertes de charges entre deux points (1) et (2) de l'écoulement le long d'une ligne de courant :

0

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + g\,z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + g\,z_2$$

$P_1 = P_2 = P_{atm}$, $z_1 - z_2 = h$

$Q_V = cte = V_1\,S_1 = V_2 S_2$ (Régime permanent ⟹ débit volumique constant)

Grand réservoir : $S_1 >>>>$ ➡ $V_1 \simeq 0$

D'où on a: $V_2 = \sqrt{2gh}$

Application numérique :

$$V_2 = \sqrt{2 * 9.81 * 5}$$

$$V_2 = 9.9\ m/s$$